

Lovasi Balázs

Téridő

A tér fogalmát minden körülmények között a testi tárgy fogalmának kell megelőznie. Bizonyos látási és tapintási benyomásoknak megfelelnek, az idő változásával nyomon követhetők, a benyomások tetszés szerinti időben megismételhetők. Ha emígyen a testi tárgy fogalmát a benyomások alapján megalkottuk, akkor az ilyen testi, térbeli tárgyak egymáshoz való viszonyát gondolatilag úgy fejezzük ki, hogy térbeli viszonyaiknak megfelelő fogalmakat alkotunk. A térbeli vonatkozások nyilvánvalóan (alapállásunkból következően) éppoly valóságosak, mint maguk a testek. Könnyen belátható, hogy a testeknek és a térnek, mint geometriai fogalmaknak függetlenségét nem tekinthetjük a priori szükségességnek.

A tér- és időfogalom fejlődése Einsteinig

Az érzékelt élmények szempontjából a térfogalom fejlődése a következőképpen zajlik: testi tárgyak helyzeti viszonyai-űr-tér. Ennél a szemléletmódnál a tér ugyanolyan értelemben reális, mint a testi tárgyak. A tudományon kívüli fogalomvilágban tehát a tér megléte kézenfekvő.

Mégis, a fizikusok tudatában a tér sokáig a történesek passzív kereteként maradt csak meg, melynek a fizikai történesekre semmiféle kihatása nincs. A fogalomképzés csak a fény hullámelméletével, és az elektromágneses mező *Faraday-Maxwell*-féle értelmezésével vett új fordulatot. Nyilvánvalóvá vált, hogy a testet nem tartalmazó térben hullámszerűen terjedő állapotok és lokalizált mezők vannak, amelyek az odakerülő elektromos töltésekre, illetve mágneses pólusokra erőhatásokat fejtenek ki. Mivel a 19. század fizikusai számára teljesen lehetetlennek tűnt volna, hogy a térnek fizikai funkciókat és állapotokat tulajdonítsanak, ezért a mérhető anyag mintájára egy egész teret betöltő közeget, az *étert* konstruálták, amely arra lett volna hivatva, hogy az elektromágneses – így például a fény terjedésével kapcsolatos – jelenségeknek is hordozója legyen. Ennek a közegnek az állapotát először mechanikusnak, a szilárd testek rugalmas deformációjának analógiájára képzelték el. Ennek a mechanikus éterelméletnek a felépítése azonban sehogyan sem sikerült, így aztán lassan megszokták, hogy az éter-mezők természetének közelebbi értelmezéséről lemondjanak. Az éterből így olyan anyag lett, amelynek egyetlen funkciója abból állt, hogy a természetük szerint tovább nem elemezhető elektromos mezők hordozójául szolgáljon. Az elképzelés a következő volt: a teret az éter tölti ki, ebben lebegnek az anyagi részecskék, illetve a mérhető anyag atomjai.

Mivel a testek kölcsönhatása a mezőkön keresztül kellett hogy történjék, az éterben még gravitációs mezőnek is kellett lennie, melynek mezőtörvénye azonban abban az időben nem öltött még pontos formát. Az éter csak a térben érvényesülő erőhatások székhelye volt. Miután a tudósok rájöttek arra, hogy a mozgó elektromos töltések mágneses teret hoznak létre, amelynek energiája modellt szolgáltatott a tehetetlenségnek, a tehetetlenség is mint az éterben lokalizált mezőhatás jelent meg. De az éter mechanikai tulajdonságai továbbra is homályosak voltak még.

Ekkor következett *H. A. Lorentz* felfedezése. Minden akkoriban ismert elektromágneses jelenség megmagyarázható volt a következő kritérium elfogadásával: az éter szoro-

san összefügg a térrel, azaz mozgásra egyáltalán nem képes. Az elektromosság szorosan összefügg a mozgó elemi részecskékkal. Lorentz felfedezését így lehetne másképp kifejezni: a fizikai tér és az éter ugyanannak a dolognak különböző kifejezései csupán; a mezők pedig a tér fizikai állapotai. Ha az éternek semmiféle különleges mozgásállapota sincs, akkor nincs okunk arra, hogy a tér mellett külön létezőnek tekintsük. Ez a gondolkodásmód azonban még távol állott a fizikusoktól, mert számukra a tér ezelőtt is, ezután is mint szilárd, homogén valami szerepelt, amely semminemű változásra, illetve állapot felvételére nem képes. Csak *Riemann* sokáig meg nem értett zsenialitása harcolta ki a 19. század közepe táján az új térfogalom elfogadását, amely szerint a tér nem szilárd, és fizikai történésekben való részvétele lehetséges. Ez a gondolati teljesítmény annál csodálatra méltóbb, mert a Faraday-Maxwell-féle elektromágneses mezőelméletet is megelőzte.

Ezután jött a speciális relativitáselmélet az összes inerciális rendszer fizikai egyenértékűségének felismerésével. Az elektrodinamikával és a fényterjedés törvényével összefüggésben adva volt a tér és az idő elválaszthatatlansága. Addig ugyanis a hallgatólagos feltételezés az volt, hogy a történések négydimenziós folytonossága objektív módon időre és térre választható szét, illetve hogy a „most” fogalomnak a történések világában abszolút értelme van. Az egyidejűség relativitásának felismerésével az idő és a tér ugyanolyan egységes folytonossággá olvadt össze, mint amilyen egységbe fentebb a három térdimenzió. A fizikai tér így négydimenziós *tér-idő*^{*} egészült ki, amely magában hordozza a térbeli dimenziókat is. A speciális relativitáselmélet négydimenziós tér-ideje éppoly merev és abszolút, mint a *Newton-féle* tér.

Egy speciális relativitáselméletből kiinduló, egyszerűsített gondolatmenet segítségével érthetővé tehetjük az egységes térelmélet lényeges vonásait. A relativitáselmélet speciális ága egy még közvetlenül empirikus törvényen, a *fénysebesség állandóságán* alapszik.

Legyen P pont az űrben, P' végtelenül kis $d\sigma$ távolságban levő szomszédos pont. P -ből t időben induljon ki fényhatás, amely P' -hez $t+dt$ időben érkezik. Ekkor

$$d\sigma^2 = c^2 dt^2.$$

Ha $d\sigma$ merőleges vetületei dx_1, dx_2, dx_3, dx_4 , ahol $x_4 = ict$ képzetes* időkoordináta, úgy a fényterjedés állandóságának fenti törvénye a következő alakot veszi fel:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2 = 0.$$

Mivel ez a képlet reális tényt fejez ki, a ds nagyságnak reális jelentőséget kell tulajdonítanunk, még akkor is, ha a négydimenziós folytonosság szomszédos pontjai úgy vannak kiválasztva, hogy a hozzájuk tartozó ds nem tűnik el. Ezt így fejezhetjük ki: a speciális relativitáselmélet négydimenziós (képzetes időkoordinátájú) tér-idejének ún. kvázi-euklideszi metrikája van.

Hogy ezt a metrikát (mértékfüggést) kvázi-euklideszinek nevezik, az a következőkkel függ össze: az ilyen metrikának a háromdimenziós kontinuumban való alkalmazása az euklideszi geometria alkalmazásával teljesen egyenértékű. Emellett a metrika jellemzésére szolgáló differenciálegyenlet nem lehet más, mint a koordinátadifferenciálokra (kicsiny, de reális dx_i mennyiségekre) alkalmazott *Pitagorasz-tétel*. A négy dimenzióra épülő matematikai sokaságot, a négydimenziós tér-időt *Minkowski* vezette be kutatási eredményeinek ismertetése során (1908). A felfedezőjéről Minkowski-féle négyes világnak nevezett sokaság szerepe nagyon jelentős, mert segítségével a relativitáselmélet jelenségei könnyebben megérthetők és szemléltethetők. A négydimenziós tér-idő egy pontját (helyesebben: eseményét) négy szám: x, y, z, t koordináták határozzák meg. Egy fizikai tömegpont képe ilyen pontok folytonos időben egymásutánja, a *világvonal*. Az ilyen világvonal meredeksége derékszögű koordináták mellett maximálva van, hiszen a fény sugar

*A „képzetes” elnevezés olyan számokra utal, amelyek kívül esnek a jól ismert valós számok halmazán. Ezen dolgozatban nem bocsátkozhatunk a komplex számok bemutatásába, csak annyit mondhatunk, hogy az i -vel jelölt mennyiség -1 négyzetgyöke, vagyis valóban nem mindennapi jelenség.

világvonalánál nagyobb meredeksége semmilyen test világvonalának nem lehet – mivel ezt a sebességet nem lehet túllépni. A Minkowski-féle négyes tér ds elmozdulásait három csoportba lehet sorolni. Ha ds^2 pozitív, az esemény ún. térszerű. Ha ds^2 negatív, úgy idő-szerű. A ds^2 lehet éppen zérus is, ekkor nullelmozdulásról beszélhetünk (ez a fénysebességgel való haladás esetén fordul elő).

A speciális relativitáselméletben – transzformáció útján – lehetségesek a koordináták ilyen változásai, hiszen az új koordinátákban a ds^2 mennyiség (mint alapvető invariáns) a négyzetek összegében fejeződik ki. az ilyen transzformációkat nevezzük Lorentz-transzformációknak. A relativitáselmélet rávezető jellegű módszerét a következő tétel jellemzi: a természeti törvények kifejezésére csak olyan törvények alkalmasak, amelyek koordinátaváltozás esetén, Lorentz-transzformáció alkalmazása mellett alakjukat nem változtatják meg (vagyis az egyenletek kovariánsak a Lorentz-transzformációval szemben).

E módszer segítségével ismerte fel *Einstein* az impulzus és energia, az elektromos és mágneses térerősség, az elektrosztatikus és elektrodinamikus erők, a tehetetlen tömeg és energia összekapcsolásának szükségességét, s ezáltal csökkent a fizika önálló fogalmainak és alapegyenleteinek száma is. A módszer azonban túlnőtt a keretein: lehet-e helyes, hogy a természettörvényeket kifejező egyenletek *csak* a Lorentz-transzformációval szemben kovariánsak, és más transzformációval szemben nem? A kérdésnek eben a formában nincs sok értelme, hiszen minden egyenletrendszert ki lehet fejezni az általános koordinátákkal. Ezért azt kell kérdeznünk: nincsenek-e a természeti törvények úgy megalkotva, hogy bizonyos különleges koordináták választása által semmi lényeges egyszerűsítésen nem esnek át?

Egészen mellékesen jegyzi meg *Einstein*, hogy a súlyos és tehetetlen tömegek egyenlőségéről szóló tapasztalati tétel kézenfekvővé teszi, hogy igennel feleljünk erre a kérdésre. Ha elvileg elfogadjuk, hogy a természeti törvények megfogalmazásban az összes koordinátarendszer egyenértékű, úgy az általános relativitáselmülethez jutunk, ha a fénysebesség állandóságának tételéhez, illetve az euklideszi geometria objektív értelmének hipotéziséhez – legalábbis a négydimenziós téridő végtelenül kis részeire vonatkozólag – ragaszkodunk. Fizikai okokra volt tehát visszavezethető az a meggyőződés, hogy a metrikus mező egyszersmind a gravitációs mező is.

Mivel a gravitációs mezőt a tömegek elhelyezkedése határozza meg, és az ezzel együtt változik, ezért ennek a térnek a geometriai szerkezete is fizikai tényezőktől függ. A tér tehát e szerint az elmélet szerint – pontosan úgy, ahogy ezt Riemann sejtette – nem abszolút többé, szerkezete fizikai hatásoktól függ. A (fizikai) geometria már nem izolált, magába zárt tudomány, mint amilyen az euklideszi geometria volt.

Az idő alaptermészete már nagyon régóta fejtörést okoz az embereknek. A különböző kultúrák gondolkodói évezredek óta rendszeresen szembetalálkoznak a következő problémával: képzelhetjük-e az időt egy változatlan és mindenek feletti létezőként, amelyre ráragódnak az események, vagy helyesebb-e maguk az események által meghatározottan tekintenünk abban az értelemben, hogy ha nem történnének események, akkor idő sem lenne. Ez a különbségtétel felettébb fontos a számunkra, mert az első feltételezés ahhoz a végkövetkeztetéshez vezet el, hogy kezdetben létezett az idő, amelyben a Világegyetem keletkezett. A másik lehetőség értelmében az időt úgy tekinthetjük, mint ami a Világegyetemmel együtt jött létre. Nem létezett tehát a Világegyetem kezdete „előtt” fogalma, hiszen akkoriban még idő sem volt.

Hétköznapi tapasztalataink alapján az idő múlását közismert természeti eseményekhez viszonyítjuk: az inga lengéséhez a Föld gravitációs terében, a napóra által vetett árnyék Föld forgása következtében látszó mozgásához, vagy egy céziumatom rezgéséhez.* Nem tudjuk megmondani, tulajdonképpen „mi” is az idő, legfeljebb azt, hogyan kell a múlását mérni. Az időt gyakran a dolgok változásának módjával határozzuk meg. Ha ez a felfogás

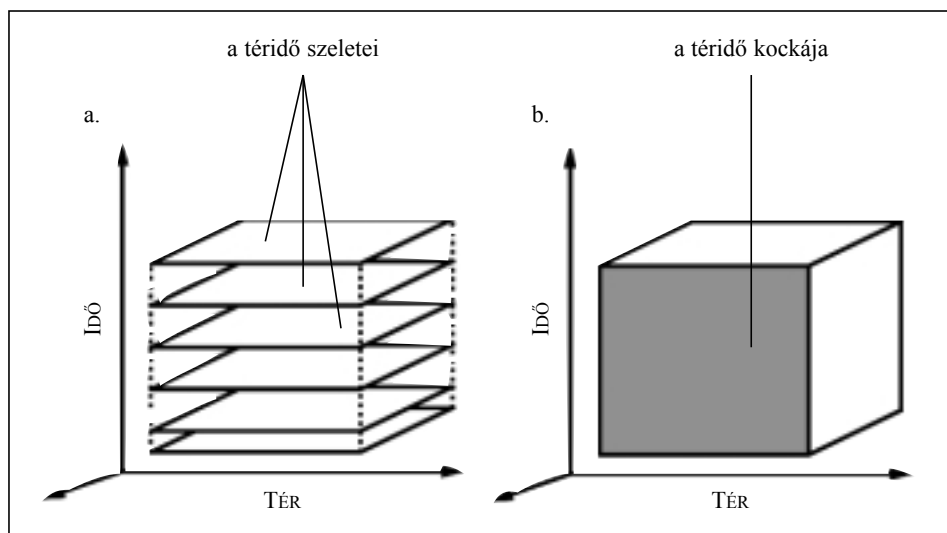
* A modern fizika a céziumatom rezgési frekvenciáját használja fel az abszolút pontos „másodperc” meghatározásához.

helyes, akkor elképzelhetetlenül különös dolgoknak kell történniük az idő természetével bizonyos szélsőséges körülmények között, mint például az ősrobbanás utáni pár pillanat.

Isaac Newton 17. századi vilásképe tapasztalattól független, transzcendentális státuszt biztosított az időnek. Az idő feltartóztathatatlanul és egyenletesen múlt, egyáltalán nem zavartatva az eseményektől, és a Világegyetemet alkotó objektumoktól. Einstein időről vallott felfogása ettől gyökeresen eltérő volt. Szerinte a tér geometriáját és az idő múlásának ütemét egyaránt a Világegyetemben levő anyag határozza meg. Akárcsak az Einstein-féle tér szerkezete, éppúgy az einsteini időfelfogás is azon az alapfeltevésen nyugodott, hogy semminek sincs kitüntetett szerepe a Világegyetemben. Teljesen mindegy, hol vagyunk és milyen mozgást végzünk, az elvégzett kísérletekből mindig pontosan ugyanazokra a természeti törvényekre következtethetünk. A megfigyelők ilyen módon történő egyen-
jogúsítása az általános relativitáselméletben azt jelenti, hogy a világegyetemben nincs kitüntetett módszer az idő mérésére. Soha, senki nem határozhatja meg az „idő”-nek nevezett abszolút jelenséget, mert amit mérünk, az mindig az Univerzumban zajló valamilyen fizikai változás üteme. A megfigyelt jelenség sokféle lehet, például a homokszemek pergése a homokórában, az óra mutatóinak elmozdulása, vagy a csap csepegése. Számítalan olyan változás létezik, amelynek megfigyelését felhasználhatjuk az idő múlásának meghatározására. Kozmikus léptékekben gondolkodva például a szerte a Világegyetemben elhelyezkedő megfigyelők a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás hőmérsékletének csökkenését használhatják az idő mérésére. Egyik módszer sem alapvetőbb azonban a többinél.

Tanulságos, ha a tér és az idő egész Univerzumát – az Einstein-féle *téridőt* – a tér szeleteiből álló toronyként képzeljük el (az egyszerűség kedvéért legyen három helyett két-dimenziós – l. ábra). az egymásra rakott szeletek mindegyike adott időpontban a tér egészét képviseli. Az idő nem egyéb, mint a tér egymáson tornyosuló rétegeinek azonosítására szolgáló címke. Belátható, hogy a téridő-tornyot sokféleképpen, azaz különböző irányok mentén szeletelhetjük fel. A felszeletelés minden módja az időmérés egy-egy különböző módszerét jelenti. Maga az egységes téridő viszont független attól, hogy milyen idő szerinti „szeletelési” módot választottunk, ami azt jelenti, hogy a téridő sokkal alapvetőbb fizikai létező, mint a tér és az idő külön-külön.

A tér és az idő Einstein-féle leírása szerint a téridő alakját a benne levő anyag és energia határozza meg. Ez azt jelenti, hogy az idő bizonyos geometriai tulajdonságok révén



Az egységes téridő

Az a. eset a b.-n látható téridő-tégla egyfajta „felszeletelése”.

A b.-téglát végtelen sok, az a.-tól különböző módon lehet „felszeletelni”.

határozható meg, ilyen tulajdonság például az egyes szeletek görbülete, vagy ami ezzel egyenértékű, az anyag sűrűsége és eloszlása az egyes szeleteken belül, mivelhogy ez okozza a görbületet. Felsejlik tehát egy olyan módszer képe, amelynek segítségével az időt – beleértve annak kezdetét és végét – összekapcsolhatjuk a Világegyetem által tartalmazott dolgok valamilyen tulajdonságával.

Annak ellenére, hogy az általános relativitáselmélet bevezeti ezeket a finomságokat az idő természetére vonatkozóan, mégsem sikerült megállapítania, ilyen volt kezdetben a Világegyetem. Téridőnk tornyának mindig van egy legalsó szelete, amelyik meghatározza, hogy az összes több milyen lesz. A kvantummechanika felbukkanásával az idő természete még furcsábbá és összetettebbé vált. Az Univerzum kialakulásának lehetséges módját azonban sokan vizsgálták Einstein óta. Az erre specializálódott tudományág – a kozmológia – és a relativitáselmélet kölcsönhatását vázoljuk fel a következő fejezetben.

Relatív kozmológia

Vajon végtelen vagy véges kiterjedésű-e ez a világ? Milyen idős a Naprendszer, és galaxisunk, a Tejútrendszer? Hogyan alakultak ki? Hány más galaxis létezik, és ezek hogyan különültek el egymástól? Hogyan jöttek létre? Milyen volt a Világegyetem, mielőtt ezek a galaxisok kialakultak? A fizikának azt a rész tudományát, amely ezeknek a kérdéseknek a megválaszolásával foglalkozik, kozmológiának hívják. A kozmológia nagyon változó tudomány. Néhány év alatt a Tejútrendszer életkora 5-ről 10 milliárd évre „emelkedett”, majd (1996 telén) az derült ki, hogy a sokáig általános elfogadott kb. 20 milliárd év helyett a Világegyetem valószínűleg „csak” mintegy 12 milliárd éves.

A kozmológusok gyakran emlegetik „kozmológiai modell”-jeiket. Ez azt jelenti, hogy az Univerzum szerkezetének és történetének olyan egyszerűsített matematikai leírását adják, amely számot tud adni a Világmindenség ma megfigyelhető legfontosabb tulajdonságairól. A kozmológiai modellek egyszerűségük mellett természetesen roppant elnagyoltak. Első feltevésként a Világegyetemet az anyag tökéletesen egynemű óceánjának tekintik, és figyelmen kívül hagyják a naprendszerek és galaxisok tömörüléseit. A modellek másik fontos vonása, hogy olyan fizikai mennyiségekkel dolgoznak – pl. sűrűség, hőmérséklet –, amelyek számértéke csak megfigyelésekkel határozható meg, ugyanakkor a modell bizonyos mennyiségek jónéhány számértékének csak bizonyos kombinációját engedi meg, hogy a modell és a valódi Univerzum egyezései és különbségei ellenőrizhetőek legyenek.

Vágujunk a dolgok közepébe: A 20. század elejéig sem a filozófusok, sem a csillagászok nem vonták kétségbe a tér állandóságát (ahogy erről szó esett). Az 1920-as években azonban ez a kép hirtelen kezdett átalakulni. Először az Einstein relativisztikus gravitációelméletének következményeit vizsgáló fizikusok véleményének hatására, majd később a távoli galaxisok fényét kutató *Edwin Hubble*, amerikai csillagász megfigyelései eredményeinek következtében. Hubble a hullámok egyik egyszerű tulajdonságát használta ki: ha a hullámok forrása távolodik a megfigyelőtől, akkor a hullámok ritkábban érik a megfigyelőt, vagyis csökken a kibocsátott frekvenciájuk. Ez a Doppler-effektus, amit a középiskolából (és az állomáshoz közeledő vonat hangjelzésére gondolva a mindennapokból) már jól ismerünk. De a fény is hullám, amit azt jelenti, hogy ha egy fényforrás távolodik a megfigyelőtől, akkor csökkenni látszik a fényhullámok frekvenciája, vagyis a fényt valamivel vörösebbnek látjuk. Ezért nevezik ezt a jelenséget a fénnel kapcsolatosan „vöröseltolódás”-nak.* Hubble észrevette, hogy az általa megfigyelt galaxisok fénye szinte kivétel nélkül minden esetben eltolódik a vörös felé. Megmérte ezen eltolódás nagyságát, s ki tudta számítani, milyen gyorsan távolodik a fényforrás. Összehasonlítva az azonos típusú (vagyis feltehetően azonos valódi fényességű) csillagok lát-

* Ezt a jelenséget Einstein már az 1910-es években megjósolta.

szólagos fényességét az egyes galaxisokban, következtetni tudott a galaxisok távolságára. Méréseire támaszkodva felfedezte, hogy minél messzebb van a fényforrás, annál gyorsabban távolodik tőlünk. Ezt az összefüggést nevezzük ma Hubble törvényének, amellyel együtt az amerikai csillagász tulajdonképpen felfedezte a Világegyetem tágulását. A bolygók és csillagok mozgásának örökké állandó szintere helyett azt találta, hogy a Világmindenség folyamatosan változik. Ez volt a 20. század tudományának addig legfigyelemreméltóbb felfedezése, amely egyúttal megerősítette Einstein általános relativitáselméletének a Világegyetemre vonatkozó megállapítását, mely szerint az Univerzum nem lehet statikus. A galaxisoknak a közöttük fellépő gravitációs erő hatására egymásba kellene zuhanniuk, hacsak nem távolodnak nagy sebességgel egymástól. A Világmindenség tehát nem lehet nyugalomban. Ha tágul, akkor történetének eseményeit gondolatban visszafelé lepergetve bizonyítottunk érezzük, hogy az egész világunk valaha kisebb és sűrűbb lehetett, sőt, a gondolatmenetet folytatva, valamikor a kiterjedése zérus kellett, hogy legyen. Ez a Mindenség történetének látszólagos kezdőpontja, amely ősrobbanás (vagy Nagy Bumm) néven vált közismertté.

De nagyon előreszaladtunk gondolatmenetünkkel. Van néhány nagyon fontos tény a Világegyetem jelenlegi tágulásával kapcsolatban, amelyet tisztázni kell. Először is: mit jelent pontosabban a tágulás? Sem a Föld, sem a Naprendszer, sem a Tejútrendszer, sem a galaxisok nem tágulnak, mivel ezen anyagtömegeket az alkotóelemeik között fellépő kémiai vagy gravitációs erők összetartják, márpedig ezek erősebbek a tágulásnál. Még a galaxisok ezreit tartalmazó galaxishalmazok léptékén is túl kell jutnunk, ha meg akarjuk figyelni, amint a tágulás úrrá lesz a helyi gravitációs „vonzáson”. Közeli szomszédunk, az Androméda-köd például közeledik felénk, mert a közte és a Tejútrendszer között fellépő gravitációs „vonzás” sokkal erősebb, mint a Világegyetem általános tágulásának hatása. Tehát nem maguk a galaxisok, hanem csak a galaxishalmazok jelzik a Mindenség tágulását. A másik zavarba ejtő tény, hogy a galaxishalmazok mindegyike tőlünk távolodik. Miért éppen tőlünk? Nem kerültünk ezzel vissza a *Kopernikusz* előtti „világ közepe” státuszba? Nem, mert a Világegyetem tágulása nem hasonlítható olyan robbanáshoz, amelynek valahol a térben volt egy meghatározott kiindulópontja. Nincs olyan rögzített háttér vagy alap, amelyhez képest végbemenne a tágulás. Maga a tér tágul, mert a Világegyetem magában foglalja a teret, s benne minden galaxishalmaz távolodik minden tőle különböző galaxishalmaztól, mint a gumilepedőre helyezett golyók, ha a gumilepedőt minden irányba egyenletesen nyújtjuk.

Amikor a német fizikus elkezdett a végére járni annak, hogy mit is mondanak az általa felállított új egyenletek a Világmindenségről, azt tette, amit a kutatók általában tenni szoktak: egyszerűsítette a megoldandó feladatot. A mindenféle köveket, kisbolygókat tartalmazó Világegyetem túlságosan bonyolult volt ahhoz, hogy kezelni lehessen. Ezért az egyszerűség kedvéért feltételezte, hogy az anyag eloszlása mindenhol egyenletes, vagyis figyelmen kívül hagyta azokat a sűrűségváltozásokat, amelyeket az égitestek jelenléte okoz. Feltételezte azt is, hogy a világegyetem minden irányban ugyanolyannak látszik. Ma már jól tudjuk, hogy ezek a feltevések meglehetősen jó közelítései a Mindenség tényleges fizikai állapotának, ezért a kozmológusok ma is használják őket, ha a Világmindenség egészének fejlődéséről akarnak megtudni valamit. Einstein azonban – legnagyobb bosszúságára – azt vette észre, hogy egyenletei megkövetelik, hogy az általuk leírt univerzumok az idő múlásával vagy táguljanak, vagy összehúzódjanak. Ebben azonban önmagában semmi rejtelmes nincs, hiszen ez a gravitáció Newton-féle leírásában is igaz. Ha egy porszemcséből álló felhőt kiteszünk valahova az űrbe, akkor az azt alkotó részecskékre egymás kölcsönös gravitációs vonzása fog hatni, ezért a felhő fokozatosan összehúzóódik. Az egyetlen lehetőség, amely ezt meg tudja akadályozni, valamiféle robbanás, amelynek hatására a porszemcsék sebesen távolodnak egymástól. A részecskék csak akkor tudnak változatlan állapotban maradni, ha valamilyen erő ellen szegül a gra-

vitációnak. Ilyen erő hiányában viszont a statikus eloszlású csillagok és galaxisok egymásba zuhannak. Einstein számára komoly gondot jelentett elméletének ez a jóslata. Nyilvánvalóan hiányzott belőle a kellő meggyőződés annak kimondásához, hogy a Világegyetem nem statikus. Akkoriban a táguló Világmindenség még elképzelhetetlenül furcsa fogalomnak tűnt, így aztán Einstein megpróbálta úgy átalakítani újdonsült gravitációelméletét, hogy kiirtsa belőle az Univerzum tágulásának és összehúzódásának lehetőségét. Rájött, hogy matematikailag van mód gravitációs egyenletébe egy olyan tag bevezetésére, amely egy, az anyagi részecskékre a gravitációval ellentétesen ható taszítóerőt ír le. Ha bevezette ezt az általa „kozmológiai állandó”-nak nevezett tagot az általános relativitáselméletbe, akkor tudott olyan modellt találni, amelyben a kozmológiai állandóval leírt taszítás éppen kiegyensúlyozta a gravitációs vonzást. Ez a modell „Einstein statikus Világegyeteme” néven vált ismertté.

1922-ben *Alekszandr Fridmann* egy fiatal szentpétervári matematikus és légkörfizikus elmélyedt Einstein számításainak tanulmányozásában. Meggyőződésévé vált, hogy mesztere egy kritikus ponton elnézett valamit. A statikus Világegyetem a módosított egyenleteknek csak az egyik, de nem az egyetlen megoldása volt. Léteztek más megoldások is, amelyek táguló világegyetemeket írta kel, pontosan olyanokat, amilyeneket az eredeti egyenletek megköveteltek. Einstein gravitáció ellen ható erejével tehát nem lehetett elkerülni a valóságos Világegyetem tágulását. Fridmann megtalálta az összes lehetséges táguló világegyetemet, amelyeket az általános relativitáselmélet egyenletei megengednek. Eredményeit elküldte Einsteinnek, a ki először azt hitte, hogy Fridmann egyszerűen rosszul számolt. Fridmann munkatársai azonban hamarosan meggyőzték őt ennek ellenkezőjéről, így Einstein is belátta, hogy a kozmológiai állandó bevezetése egy, a valóságostól teljesen elrugaszkodott világegyetemet eredményezett. Ha ugyanis Einstein statikus Univerzumát a legcsekélyebb mértékben is megváltoztatjuk, az elkezd tágulni vagy összehúzódni. Az einsteini megoldás eredményeképpen kapott Mindenség éppoly instabil képződmény, mint egy hegyére állított tű (az ilyesfajta állapotot nevezi a fizika „metastabilnak”). Sok évvel később Einstein úgy emlegette kalandját a kozmológiai állandóval, mint élete legnagyobb tévedését. A feleslegesnek bizonyult tag bevezetésével elszalasztott egy soha vissza nem térő, szenzációs lehetőséget: gravitációelmélete alapján előre jelezhetette volna, hogy Világegyetemünknek tágulnia kell. Így az érdem Alekszandr Fridmanné lett. Sajnos, Fridmann nem érthette meg azt a pillanatot, amikor Edwin Hubble megfigyelései bebizonyították jóslata helyességét, és amikor ezt követően a táguló Világegyetem elmélete széles körben elfogadottá vált.

A táguló Univerzum képéből következik, hogy a múltban valamikor valamilyen ropant heveségű eseménynek kellett történnie. Ha a Mindenség tágulását gondolatban megfordítjuk, és az eseményeket az időben visszafelé követjük, akkor úgy tűnik, hogy eljutunk a „kezdetig”, amikor minden összeütközött mindennel: a Világegyetem összes anyaga végtelen sűrűségű állapotba volt összenyomva. Ezt az állapotot a „kezdeti szingularitás”-nak nevezzük. Jelenlétének képe a modern kozmológia elgondolásainak számos metafizikai és teológiai magyarázatát sugalmazta.

A Mindenség ma megfigyelhető tágulási sebessége és a tágulási sebesség csökkenésének üteme alapján kikövetkeztethetjük, hogy a kezdeti szingularitás állapotának kb. 12 milliárd évvel ezelőtt kellett lennie.

Az 1930-as évek elején sok kozmológus nem szívesen gondolt arra, hogy a tágulás valóban egy végtelen sűrűségű szingularitásból kezdődött. Az elképzelés az alábbi okok miatt tűnt elfogadhatatlannak: arra kell számítanunk, hogy a Világegyetemet kitöltő anyag és sugárzás által kifejtett nyomás nem engedi, hogy az Univerzumot nulla térfogatúra nyomjuk össze. Az összezsugorodó anyag visszapatann, mintha egy csomó biliárdgolyó ütközne össze egymással. Mások szerint a kezdeti szingularitás elképzelése csak azért merült fel, mert elfogadtunk egy olyan képet, amelyben a Világegyetem minden

irányba ugyanakkora sebességgel tágul. Ezért amikor a tágulást időben visszafelé követjük, minden anyag pontosan ugyanakkor érkezett ugyanazon pontba. Ha azonban a tágulás kissé aszimmetrikus volt, akkor a mozgást visszafelé követve a kifelé repülő anyag nem lesz szinkronban, így könnyen elkerülhető a szingularitás kialakulása.

Amikor ezeket az ellenvetéseket alaposabban megvizsgálták, semmiképpen nem sikerült kiküszöbölni a szingularitást. Sőt, a nyomás figyelembe vétele még segítette is a szingularitás kialakulását, méghozzá a tömeg és az energia Einstein-féle $E=mc^2$ összefüggéssel kifejezett egyenértékűsége miatt. A nyomás tulajdonképpen az energia egyik formája, így egyenértékű a tömeggel. Ha nagyon nagy értéket vesz fel, gravitációs erőt ébreszt, amely ellentétes hatású a taszítással, amelynek képzetét általában a nyomáshoz társítjuk. Amikor Einstein gravitációelméletét felhasználva megpróbáltak olyan világegyetemet keresni, amelyekben a tágulási sebesség nem ugyanakkora minden irányban, vagy helyről helyre változik, a szingularitás mindenképpen megmaradt. A szingularitás tehát nemcsak a szimmetrikus világegyetemek velejárója, hanem feltételen szükségyszerűség.

Einstein óta a tudomány azon dolgozik, hogy felépítse az anyagot alkotó elemi részecskék helyes és átfogó elméletét, mivel a kezdeti szingularitáshoz időben közeledve az események a makroszkopikus törvények helyett a részecskefizika előírásai szerint mentek végbe. Mindezen kutatások azon a feltevésen alapulnak, mely szerint Einstein gravitációelmélete helyesen írja le a Világegyetem egészének tágulását. Igaz, az elmélet sikerrel állta ki az összes lehetséges megfigyelés próbáját, de ez nem jelenti azt, hogy nyugodt lélekkel alkalmazhatjuk egészen a kezdeti szingularitásig, vagyis a tágulás kezdetéig. Éppúgy, ahogy Newton gravitációelmélete csődöt mond, amikor a fényéhez közeli sebességekkel és nagyon erős gravitációs terekkel kell dolgozni, várható, hogy létezik a fizikai viszonyoknak egy olyan szélsőséges tartománya (mint pl. a fekete lyukak is), ahol végül Einstein elmélete is kudarcot vall. Erre akkor kell számítanunk, amikor az első 10^{-43} másodperc eseményeit akarjuk leírni. Ebben a „Planck-idő”-nek nevezett időszakban az egész Univerzumot kvantummechanikai bizonytalanságok uralták, ezért teljes leírása csak akkor lehetséges, ha sikerül a gravitációt a természet másik három alapvető kölcsönhatásával a „Mindenség Elméletében” (Theory of Everything) egyesíteni. Ha el akarjuk dönteni, hogy bármilyen értelemben volt-e a világnak kezdete, akkor előbb meg kell értenünk a gravitáció viselkedését ebben az időszakban. A kvantumgravitáció lehetőségeinek számba vétele azonban – több más, itt felmerülő problémával együtt – nem ezen dolgozat feladata.

Az általános relativitáselmélet a kozmológiai vizsgálódások azóta sem csillapodó áradatát hívta életre. Az Einstein-Fridmann-féle táguló Világegyetemet rengeteg fizikus, később pedig kozmológus boncolgatta tovább. Különböző megfigyelési eredmények kisebb-nagyobb eltérései azonban arra serkentették a tudósokat, hogy újabb Világegyetem-modelleket állítsanak fel univerzumuk mind pontosabb leírására. Ezen modellek sokszínűségének bemutatásával itt nem foglalkozhatunk, azt azonban elmondhatjuk, hogy a va-

*A táguló Univerzum képéből
következik, hogy a múltban
valamikor valamilyen roppant
hevességgű eseménynek kellett
történnie. Ha a Mindenség
tágulását gondolatban
megfordítjuk, és az eseményeket
az időben visszafelé követjük,
akkor úgy tűnik, hogy eljutunk
a „kezdetig”, amikor minden
összeütközött mindennel:
a Világegyetem összes anyag
végtelen sűrűségű állapotba volt
összenyomva. Ezt az állapotot
a „kezdeti szingularitás”-nak
nevezzük. Jelenlétének képe
a modern kozmológia
elgondolásainak számos
metafizikai és teológiai
magyarázatát sugalmazta.*

lóságot legjobban megközelítő módosítások furcsa végkimenetel felé tartanak. Először kiderült – *Alan Guth* 1979-es elmélete nyomán –, hogy a tágulás valószínűleg nem volt egyenletes, hanem egy hirtelen „felfúvódó” szakasszal kezdődött. A felfúvódás-elmélet aztán szülőatyja lett más, még nagyobb pontosságot megcélzó elméleteknek. Ezen teóriák az átlagos emberi elme számára már teljesen elképzelhetetlen „bolondságok”, de bizonyításuk – furcsamód – mégsem teljesen lehetetlen. A relativitáselmélet egyenletei például – bizonyos körülmények között – megengednek olyan extrém megoldásokat is, amelyek szerint a Világegyetem-„gömb” felszíne nem sima, hanem az egymástól elszigetelt téridőpontokat valamiféle járatok, ún. „féreglyukak” kötik össze egymással. (Ez jelenik meg például *Carl Sagan* csodálatos sci-fi regényében, a *Kapcsolatban* is.) Ezek a féregjáratok aztán befűződhetnek, és ezzel bizonyos világegyetem-részek egymástól független univerzumokként létezhetnek tovább. A féreglyukak „bejáratai” egyes tudósok szerint a neutroncsillagok összeomlásából született szupersűrű objektumok, a fekete lyukak.

Egy-egy ilyen modell már a relativitáselméleten és kvantumfizikán egyaránt alapszik. A fizikának ez az első egyesítése nagyon sok hasznos eredményt hozott az egyszerű fantáziálgatáson túl. Kiderült például, hogy a fontosabb természeti állandókat az előbbi modell alapján a féreglyukak hálózata határozza meg. Minthogy azonban az elmélet kvantumfizikai is, a féreglyukak elhelyezkedése a határozatlanság által befolyásolt – a természeti állandók tehát csak statisztikailag adhatók meg! Az egyik ilyen természeti állandó a híres „kozmológiai állandó”, melyet már fentebb említettünk. Ezt Einstein azért vezette be az általános relativitás egyenleteibe, hogy statikus világegyetemet kapjon eredményül. Később azonban az ötletet elvetette. A kozmológiai állandó szerepe az volt, hogy létrehozza azt a nagy hatótávolságú taszítóerőt, amely képes ellensúlyozni a tömegek közötti gravitációs kölcsönhatásból eredő vonzóerőt. Megtehetjük ugyan, hogy egyszerűen elvetjük a gravitációs törvény ilyen kiegészítésének a lehetőségét is, valójában azonban nincs semmilyen érv amellett, hogy miért ne szerepelhetne egy ilyen tag Einstein egyenleteiben. A kozmológiai állandó, ha nem is képes megállítani a Világegyetem tágulását, megváltoztathatja a tágulás ütemét. Az Univerzum tágulásának sebességére vonatkozó megfigyelések szerint ha létezik is kozmológiai állandó, annak értéke rendkívül kicsiny, számértékileg kisebb, mint 10^{-120} . Ellenben a korai Világmindenségben létező elemi részecskék és mezők vizsgálata során ezzel homlokegyenest ellentétes körülmények adódtak. Ezek a kutatások nemcsak az állandó létét jósolják meg, hanem azt is, hogy ennek értéke roppant nagy. A féreglyuk-elmélet azt követelné meg, hogy a kozmológiai állandó értéke pontosan nulla legyen, legalábbis a mienkhez hasonló világegyetemben. Az állandó lehet zérustól különböző is, ez azonban azt vonná maga után, hogy hatása miatt a féreglyuk végén fűvódó univerzum nem tud megfelelő nagyságúra duzzadni. A későbbi kutatások azonban a *Coleman* ezen 1988-ban tett feltevését meggyőzően cáfolták. A galaxishalmazok eloszlásában 1993–1994 között felfedezett megdöbbentő periodicitás magyar kutatók szerint csak egy olyan univerzumban lehetséges, ahol a kozmológiai állandó értéke nem nulla. A mérési adatok a kozmológiai modell eddig meghatározatlan paramétereinek pontos illesztését is lehetővé teszik, s egyszer – talán nem is olyan sokára – pontot tehetünk a sok találgatás végére, s megtudhatjuk, milyen igazából Einstein rettegett, táguló Világegyeteme.

Irodalom

- BARROW, J. D.: *A fizika vilásképe*. Akadémiai Kiadó, Bp. 1994.
 BARROW, J. D.: *A Világegyetem születése*. Kulturtrade Kiadó, Bp. 1994.
 EINSTEIN, ALBERT: *Hogyan látom a világot?* Gladiátor Kiadó, Bp. 1995.
 EINSTEIN, ALBERT: *A relativitás elmélete*. Kossuth Könyvkiadó, Bp. 1993.
 OREAR, J.: *Modern fizika*. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1971.